免责声明：凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。

能源地平线：空军的能源科技愿景

Energy Horizons—A Science and Technology Vision for Air Force Energy

马克·T·梅博瑞博士（Dr. Mark T Maybury）

引言与愿景

美国空军正面临着严峻的能源挑战，且挑战势必进一步加重，这是因为全球能源需求不断增加，能源供应日趋减少，加强环境保护的呼声日益高涨。当前每年里，空军航空油花费超过 90 亿美元，和太空行动相关的地面运作的能源费用超过 1 亿美元，支持指挥控制和情报中心的网络运作的能源耗费亦以数千万美元计。（能源消耗比例份额见图 1。）我们的对手越来越把能源设施作为攻击重心。迄今为止，在伊拉克和阿富汗战场，有三千多名美国军人和承包商人员为护送补给车队而牺牲或受伤（大约每 30 个车队中有 1 人伤亡），车队运输补给物资中有 80% 是水和燃料。

根据国防部《能源为战士：作战能源战略》、《2010 年空军能源计划》和《国家航空研究和发展规划》这三部政策文件，空军编制了标题为《能源地平线：2010-2026 年空军能源科技愿景》的报告 。[1] 空军的能源愿景希望推动“将能源问题纳入我们所有工作的考虑之中”，包括了解“能源如何影响空军‘全球警戒、全球到达、全球力量’这三大关键能力”。[2] 进一步，这份报告提出了“确保在天空、太空、网空和基础设施领域保持稳固的能源优势”的目标。[3]

航空能源

空军是国防部最大的能源用户，每年需要消耗超过 20 亿加仑航空油，使燃油消耗成为空军能源消耗中的最大一类（占 84%），并因此成为空军中最大的开销项目之一。空军正在努力改进运作，新近研制的飞机（如 C-17 和 F-35）在燃烧效率方面比旧飞机（如 C-141 和 F-16）提高 50%-125%。[4] 图 2 显示

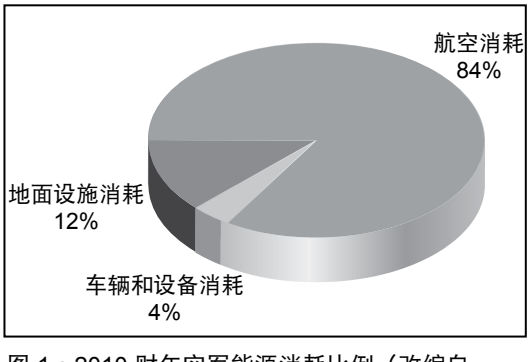

图 1：2010 财年空军能源消耗比例（改编自：Headquarters US Air Force, Air Force Energy Plan 2010 [2010 年空军能源规划], Washington, DC: Headquarters US Air Force, 2010], 4, http://www.dm.af.mil/shared/media/document/AFD-101202-066.pdf.）

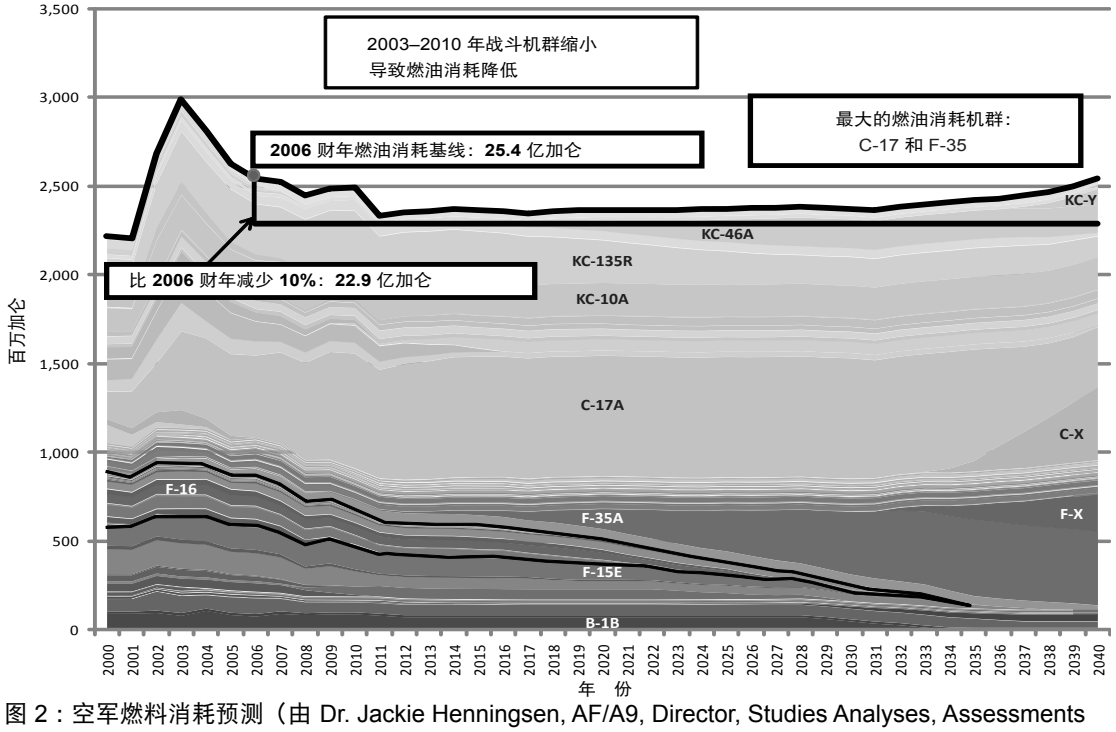

图 2：空军燃料消耗预测（由 Dr. Jackie Henningsen, AF/A9, Director, Studies Analyses, Assessments and Lessons Learned 提供）。

了空军机动部队、空中作战部队和特种作战部队到 2040 年的燃料消耗预测。

在航空领域，我们运用布列盖航程方程式作为统一计算法，同时测定能源效率、相关能源消耗和飞机能力的进展情况：[5]

$$\text{航程} = \frac{V}{SFC}\frac{L}{D}\ln\left(1+\frac{W_{\text{燃料}}}{W_{\text{有效负荷}}+W_{\text{飞机}}}\right)$$

在这个方程式中，通过提高升阻比（L/D）和减少飞机总重（$W_{\text{有效载荷}} + W_{\text{飞机自重}}$），可以测算出飞机机体的效率改进。此外，我们可以通过耗油率（SFC）相对于速度（V）的比值测算出推进装置的效率增益。通过所有这些因素把能耗与航程联系起来，就确定了战斗机能力与能量 - 效率属性之间的关系。航空领域的科技投入就在于优化布列盖方程中的相关因素（表 1）。这些努力在空气动力学、推进和动力、材料和结构、航空操作、能量采集、革命性新概念等诸方面都取得进展。表 1 表明了以下几点：空军在哪些方面必须保持领先；在哪些方面需要通过迅速采纳、适应、或加强他方投资而保持紧密跟进；在哪些方面应该作为旁观者关注空军所依赖的那些投资（核心职能之外的那些投资）。

空气动力学

表 1 的第一部分列出对目前和未来飞机在空气动力学方面的改进，包括尾翼片、翼梢小翼、减阻微槽、保形天线等各种流线改进，这些努力能降低油耗 4-6%。同样，重心控制和升力分布控制系统的改进，能确保相对于承载重量的位置来把升力有效地分布于整个机体，从而增强飞机的性能。中期和远期的

表 1：航空能源科技展望（L = 保持领先；F = 保持跟进；W = 保持关注）

	近期（2011-15年）	中期（2016-20年）	远期（2021-25年）
空气动力学	整流装置 (L)	保形天线 (F)	层流化 (战斗机) (L)
	重心控制 (L)	层流化 (机动保障机) (F)	
	升力分布控制 (L)	系统整合 (机动保障机) (F)	
	翼梢小翼、尾翼片、导流片 (F)	系统整合 (战斗机) (F)	
	斜削翼 (F)	机翼机身融合体 (F)	
	微型叶片 (F)	X-翼 (F)	
		产生升力的机身 (W)	
			等离子体增强减阻 (W)
推进和动力	自适应多用途引擎技术 (L)	高效嵌入式涡轮引擎 (L)	先进与章动周期 (L)
	高效小型推进器 (L)	引擎特定改进 (L)	涡轮风扇复合 (W)
	重油 (F)	子系统整合 (L)	超高旁路 (W)
	齿轮传动涡轮风扇 (F)	按需供力 (机动保障机) (F)	
		按需供力 (战斗机) (L)	
		开式转子发动机 (W)	
		混合/电力推进器 (W)	
	替代和生物燃料质量评定/认证 (L)		
	替代和生物燃料批量生产 (W)		
		先进发电技术 (F)	
材料和结构	飞机部件 (系留装置、托盘、机架) (L)	多功能材料 (F)	
	照明 (F)	无线控制系统与电气作动器 (W)	
	复合材料 (L)		
	复合集装箱 (F)		
	变形材料 (F)		
	混合材料/高级铝材 (F)		
航空操作	编队飞行 (L)	持续补给改进 (L)	
	任务指标飞行 (F)		
	分布式任务训练和互动式模拟器 (L)		
	有助于人力表现改进方面的考量 (L)		
	遥驾飞机 (RPA) 任务执行能力扩大 (L)		
	天气预报、探测、规避能力的改进 (F)		
	加强任务执行效率的更好方式 (F)		
	任务规划软件 (F)		
能量采集	用于冷却的热电 (L)		
		小型 RPA 的能量收集 (L)	
	光伏电池 (F)	电磁制动 (F)	
	热电废排回收 (F)		
	通用热电再生 (F)		
		声能 (W)	
新概念		混合型飞艇 (F)	分离式系统 (L)

目标包括层流化机翼设计（可实现节油 15%）和非传统机体设计，例如机翼机身一体化、盒式机翼，以及升力体结构。

推进和动力

表 1 的第二部分展现推进技术为多种平台提供降低油耗的可能性。在这个领域，空军将引领许多技术，或者紧紧跟进未来民间现成技术。例如，自适应多用途发动机技术已经改进了压缩机和一个第三气流，它们有可能使战斗机节省大量能量（降低 15-25% 耗油率）。此外，高效嵌入式涡轮发动机有可能将机动保障飞机和其它平台的耗油率改善 25%。中期和远期技术发展势必形成突破，超越传统的布雷顿（Brayton）发动机（空气喷气）概念，取得更高效率，比如混合压力

增益燃烧循环、混合涡轮复合循环、热交换循环（中间冷却与再生式）、内涡轮燃烧导致等温膨胀循环，以及正排量压缩内核等技术。对于较小型的飞行器，像高效小型推进装置等项目，期望能降低大约 25% 的耗油率，尤其对遥驾飞机而言。空军在其机群全部通过费托 /JP-8 50/50 混合燃油认证后，将继续领先探索新型可持续发展燃料的使用和认证。随着能源部、农业部和海军部启动了生物燃料联合生产项目，空军将密彻关注和利用生物燃料的生产。

材料和结构

从表 1 的第三部分可以看到，在合成材料和碳纳米管方面的材料研究，有希望改进飞机结构和集装箱性能，从而减轻重量，提高抗拉强度、传导性、热管理和能量储存，这些都有助于降低燃料消耗。改良材料有时也能导致改善生产成本、大量减少零配件（比如固定件）数目、降低维护成本，以及减少对前沿部署的后勤保障印记。其它的减重技术包括无线控制系统、电动（而非液压）致动器、发光二极管、以及用合成纤维系缆取代笨重索链。此外，合成材料和变形材料的柔弹性有可能使某些飞机部件 ——比如翼片和涡流发生器——能根据气流和飞机进攻角度自行调节，从而产生更理想的燃油性能。在中期和远期，多功能材料蕴藏着令人向往的先进能量采集潜力，可以阻止能量以热和噪音形式而损耗掉。

航空操作

如表 1 的第四部分所示，对航空操作加以改进，相对降低其前期成本可取得良好的效率增益。例如，C-17 飞行编队试验已经证明：殿后飞机可节省燃油 5-10%，而对机组人员、结构因素，或计划调度等的影响有限。此外，在商业航空公司的带动下，空军实施任务指标飞行，旨在优化巡航飞行高度和速度，以及针对飞行状况调整升降剖面线。充分利用分布式、互动式飞行模拟器（例如连接 KC-135 和 F-16 的模拟器），不仅降低实战的训练成本，而且能模拟敌对及拥挤空域环境以保证训练安全，从而有助于加强战备完好率。改进的作战规划软件更加关注任务因素、实时天气状况和任务要求，从而减少飞行架次和低效率的飞行路线规划。另外，未来的遥驾飞机和自主式飞机可以按照目前由传统飞机执行的机动保障和战斗任务的具体需要来定制组配，这样做还能减少飞行的能量总印记。最后，优化任务规划和飞机基地分配，可以更合理地向前进基地安置维护需求飞较少的飞机，从而降低二阶效应成本（比如减少向前进基地运送部件的数量）。

能量采集

表 1 的第五部分表明，空军通过科研努力可以把热电能转换概念和其它能量捕获概念（如从电磁制动中回收噪声 / 振动的能量）相结合，电磁制动有可能降低维护成本和系统重量，也能捕获制动能量再用于飞机滑行。未来的使用多种能源的飞机有可能采集多种能源，包括多种燃料、太阳能、热能、风能和振动能，从而减少甚至消除对传统燃料的需求。对小型遥驾飞机来说，一些新概念（比如飞机栖息充电，或者从热源或电源中收集能量），能保持它持续自主运行。能量采集新技术能改变我们的许多操作方式；然而设计、能量密度、系统整合、成本等方面的挑战也需要我们关注。

革命性新概念

表 1 的最后部分提出了偏离传统飞机构造的替代概念。在中期，可能发展出混合型

飞艇，这种航空器混合利用气囊内气体（通常是氦气）的浮力和飞艇巨大表面积周围空气流所产生的气动升力。各种困难的操控问题仍有待解决，例如地面运输、避让恶劣天气、浮力控制和基础设施。但是预计每磅货物的运输成本将大大低于传统空运。高空飞艇还可用于情报、监视和侦察（ISR）任务。在远期，分离式系统——可根据任务要求分解和重组的系统——有望提供更有效的 ISR、机动保障和集群攻击能力。

航天能源

航天装备和航空装备不同，它不使用传统的航空燃料实施机动保障（空运和空中加油）。把航天器送入运行轨道之后，除了极少的机上消耗品（例如卫星机动所需的推进动力）之外，其能源消耗主要和地面控制及数据处理设施的运作相关（每年超过 1 亿美元）。在空军太空司令部执行各种任务的能源消耗中，地面设施占 97.2%，地面车辆运输占 1.8%，火箭发射占约 1%。相较而言，商业航天界的一些太空运行系统设施规模小，人员少，有些系统甚至做到自主运行。地面雷达、冷暖通风空调系统等也有改进余地，可为降低能源成本提供机会。此外，在和航天系统运行相关的能量生成、储存和输送方面，也有数种技术正在研制之中，前景看好（表 2）。

能量产生

表 2 的第一部分列出太空的能源生成方式，重点是高效率和大功率光电能源、阳光催化石油技术，以及核能。目前的太阳能效率范围从柔性非晶体硅的 10%，到反转变形太阳能电池板的 34%，直到远期展望中量子点和稀释氮化物的（在理论上）高达 70%。这些科研努力的重要意义在于：太阳能电池生成能量的效率每提高 1%，就能转化为系统能量提高（或质量减少）3.5%。极大型可部署太阳能电池板的代表产品，就是美国空军

表 2：航天能源科技展望（L = 保持领先；F = 保持跟进；W = 保持关注）

	近期（2011-15年）	中期（2016-20年）	远期（2021-25年）
能量产生	30-35% 高效光伏电池 (L)	40% 改进的光伏电池 (L)	70% 高效光伏电池（例如量子点）(L)
	大功率太阳能电池板/一体化盖毯式互联系统 (L)	阳光催化石油 (F)	
		用于轨道系统的天基核电站（F）和用于地面站的小模块核电站 (F)	
能量储存	飞轮用于太空系统 (L)	纳米材料用于大功率高密度储能 (F)	
	家用锂离子电池的太空应用 (F)		
	设施规模的能量储存 (F)		
推进和动力	高效微处理器 (F)	光子计算技术在太空的应用 (F)	量子计算 (F)
	高效轨道推力器 (L)	高效霍尔和电动推力器 (L)	电磁推进器 (L)
		在轨卫星加注燃料 (L)	由本机光伏电池或光束能系统驱动的电动推力器 (L)
航天操作	节能数据中心和地面站 (F)，云计算 (F)	地球基地换用高效太阳能 (F)	地面操作做到自主“断电”(F)
	采纳商业上的先进做法 (F)	开发更大的卫星自主能力 (L)	先进机载自主能力 (F)
		对航天功能实行跨领域研究 (L)	分离式、太空对太空波射动力卫星组网 (L)
	改进高效运载火箭技术 (F)	探索助推系统重复使用概念 (F)	革命性的小/中型发射，包括小卫星空中发射能力 (L)

研究实验室和波音共同研制的 30 KW 一体化盖毯式互联系统大功率太阳能电池板。从中期到远期，“阳光催化石油”是能源部资助研制的样机系统，目的是把二氧化碳和水转变成一氧化碳和氢气，最终生成液体燃料。此外，将一个 500 kW 的动力装置布置在轨，可以保障天基传感和动力波射任务。全新的技术概念则包括：从地球磁场采集能量，以及从系统的废热中采集能量。在核能的应用方面，已有好几种卫星系统（例如放射性同位素热电发电机）做出验证。另外，已经设计出埋入地下的、自主安全的、自耗废料的小型模块化核反应堆，用于保障地面操作设施的能量需求。

能量储存

表 2 第二部分涉及能量储存。为了响应环保要求，2012 年以后将停止在镍氢（Ni:H）电池中使用特氟隆 -30 镍氢隔膜材料，因此，研究人员必须加紧研制出锂离子化学物提速寿命试验技术，这对未来国家太空安全使命有重要意义。在近期，像飞轮这样的储能技术，借助反作用轮的附加特征，能够提供需要的能量，具有帮助姿态控制的潜力。在中远期，纳米材料技术的发展有希望实现大功率、高密度储存、高周期与放电率，以及延长电池寿命。相比之下，地面站和数据中心可以利用混合储能技术，包括传统的铅酸电池和大型飞轮。

推进和动力

表 2 的第三部分论述航天器的推进装置和动力。在轨系统，如传感器、通信和机载处理设备等，都需要使用大量动力。

近期的发展重点是高效微处理器，此后将关注像忆阻器、光子计算和量子计算等创新科技，以大幅度提高能源效率（在下面的“网空能源”部分进一步论述）。这些技术有许多优势，包括比硅替代品体积更小及热负荷减少。

卫星推进技术的进展对提轨、驻位和机动，尤其对近地轨道卫星来说，都是至关重要。在中期，需要探索如何加强现有卫星系统的生存能力和延寿。在中远期，诸如霍尔和电动推力器等技术可能导致延长使用有限的机载推进剂；利用波射动力给在轨卫星加注燃料的技术也有望给航天器延寿。在远期，电磁推进作为一种先进概念，可能有助于实现航天器进一步延寿和提高其工作弹性。利用从周围环境中捕获的能量储备在机上，这些系统能在没有推进剂的情况下长期在太空中机动，从而提供更多更大的运行能力。

航天操作新技术

正如在航空领域那样，表 2 第四部分所示的航天操作新技术也可能产生重大的节能效果。鉴于地面系统占去整个航天运行能耗量的 97%，近期内，应该采用商业数据中心在采暖通风空调和电力管理以及云计算等方面的最佳做法，其详细讨论见下面的“网空能源”和“基础设施能源”部分。首要关注的是传统的发射场、控制站、数据处理中心和地基太空雷达。在中期和远期，通过提高自主能力，将减少对操作员和相关能量的需要。再生能源也是可行的选择，可用来缩小这些设施的能源印记并保证能源的独立性。从长远来看，虽然太空对地球波射动力技术面临许多挑战，但太空对太空波射动力技术的发展可能使“分离式”卫星成为可能，这种卫星不仅体积更小，而且比目前系统能力更大、更分散、生存性更强。我们还有必要开展多领域分析，审视在天空和太空领域执

行任务的相对能源效率。最后，提高运载火箭的效率将有助于航天事业的进一步发展。

网空能源

空军的所有运作和使命，尤其是能源基础设施本身的运作，都依赖网络基础设施。这种依赖性将继续增大 ，因为空军正在发展自主系统，通过网络使系统之间及系统与人员之间彼此相连，从而以更低成本投送更大能力。如何保护我们的天空和太空资产，确保经由这些网空平台实施指挥控制、通信、ISR，以及精确打击目标，这一切都攸关空军的全球力量投送，攸关空军信守“全球警戒、全球到达、全球力量”的誓言。我们的对手势将千方百计通过网空攻击来拒绝、削弱、操纵、瓦解或摧毁我们的关键基础设施，从而破坏我们的关键使命能力。

随着设备的体积、重量和能耗下降，对紧凑型储能装置的需求也相应出现。在过去 15 年里，每千瓦功率能支持的每秒浮点运算次数（flop/kW）已经提高了 700 倍，从 25 亿次提高到 19450 亿次。我们预期，这种能源效率每 1.6 年翻一番的趋势将会持续到 2020 年，使高性能计算系统层面的能源效率超过每瓦功率支持 1000 亿次浮点运算，这将极大地提升数据中心的能力。[6] 也将有可能让该领域的内嵌式系统进行更为复杂的数据处理。

网空能源的一个重要衡量标准是电量使用效率（PUE），它等于设施的总电量除以信息技术设备的电量，从而测算出基础设施除服务器本身之外所消耗的电量。举例来说，如果服务器每消耗 1 瓦电量，基础设施还要另消耗 0.5 瓦，那么 PUE 就是 1.5。目前一流企业在 PUE = 1.2 的水平上运作。

空军对网空能源的目标展望包含四个方面：保障军队使命、优化人 / 机系统、加强敏捷性和韧性、开辟新基础概念（表 3）。

保障军队使命

空军的各项使命，比如持续性大面积的监视，需要用超级计算机进行海量数据分析，才能投送俗话说的“大海捞针”这一关键能力，从而减少人工负荷。另一种极端情况是，秘密特种作战部队仅具备有限的通信设备、时间和蓄电池容量，然而却需要随身携带仅在几年前需要超级计算机才能胜任的计算能力。更令人生 畏的是，如鸟一般大小自主飞行和运行的微型飞行器必须能在微小物理空间内执行高性能计算机运算。到 2020 年，这些飞行器还将进一步微缩到昆虫般大小，届时计算能力问题会更加突出。一旦把超级计算机的海量数据分析功能与嵌入式高性能计算能力两相结合，空军将获得执行新使命的能力。

如表 3 的第一部分所述，在下个 15 年内，如果达到系统层面的能源效率，并找到提高另一个 700 倍的技术途径，就能满足所有这些任务的需要。像三维堆叠这样的技术发展，如能克服耗电芯片过热的问题，就不失为一项颠覆性创新技术。除了计算机构造、组合和系统整合方面的改进之外，如果进一步考虑算法规则及软件与附属硬件配置和软件体系结构本身的交互作用，我们会取得诸多收益。美国空军研究实验室 500 万亿次浮点运算的“秃鹰”集群超级计算机已经表明，达到这种平衡能带来能源效率的数量级提升。[7] 通过把 1716 台索尼 Playstation-3 游戏机与 176 台英伟达（Nvidia）通用图像处理器联结起来，该系统能进行多种密集型计算数据分析，并能维持超过 50% 的高峰操作性

表 3：网空能源科技展望（L = 保持领先；F = 保持跟进；W = 保持关注）

努力方向	领域	近期（2011-15年）	中期（2016-20年）	远期（2021-25年）
保障军队使命	系统效率	-- 算法/编码/硬件效率 (L) -- 硬件构造 (3-D芯片) (如内存记忆) (L) -- 高效软件构造 (L) -- SWAP (体积/重量/动力) 高效计算机技术 (F) -- 节能高性能计算 (HPC) 资源控制 (W) -- 轻质硬件 (W)	-- 纳米传感器的发展；纳米处理技术 (L) -- 芯片上综合光学单光子量子密钥分发/处理 (L) -- 处理器能源最优化 (F) -- 计算机供电最优化 (F) -- 环境自适应计算 (W) -- 智能 HPC 资源控制 (W) -- 计算机供电优化 SWAP－高效计算机技术 (W)	-- 硬件构造发展 (3-D芯片) (L) -- 量子计算技术 (F) -- 基于忆阻器的神经形态电路用于高效认知计算 (F) -- SWAP－高效计算纳米结构 (F)
	可再生能源	-- 基于纳米技术的构造 (F) -- 芯片的替代能源 (电池、超级电容器等) (W)	-- 利用可再生能源 (如太阳能) 的小型计算系统 (W) -- 替代能源 (太阳能、风能、地热) (W)	-- 用于微型遥驾飞机的微型能量采集系统 (F)
优化人/机系统	文化观念	-- 上级命令 (L) -- 有关节能的文化观念/行为改变 (L) -- 度量、数据一致性和测量法 (F)	-- 人对网络的信任 (L) -- 人力绩效的感知和增强 (L) -- 服务器迁移 (印记) (F)	-- 对人/机组合团队的信任 (L)
加强敏捷性和韧性	电力	-- 制定节能政策/程序 (L) -- 监测与控制系统 (F) -- 智能电网 (F)	-- 替代能源 (太阳能电池、燃料电池等) (W) -- 绿色建筑 (W) -- 安全智能电网 (F)	-- 遥测与遥控系统 (能源中央控制) (F) -- 结实、安全的智能电网 (W)
	云计算	-- 高效计算算法 (L) -- 基于用图像处理单元做通用计算的多样化商用现成HPC系统 (W) -- 分布式无线技术 (W) -- 云计算技术 (W)	-- 服务器软件的优化 (L) -- 网络安全 (L) -- 云环境中软件结构设计的安全与保证 (L) -- 优化超级计算机的使用 (F) -- 云服务/计算 (F)	-- 网空能源管理系统 (F) -- HPC 保障的自主能力 (W) -- 使用智能系统每年降低人力/能源消耗10% (W)
开发新概念	革命性科技		-- 新兴纳米技术 (L) -- 新兴超导技术 (F) -- 新兴量子设备 (F)	-- 按需超导技术 (F) -- 纳米技术的随时可用性 (F) -- 量子的随时可用性 (F)

能，同时仅耗电 257 kW。然而案例研究曾多次证明：任务应用、运算法则和系统结构之间如果匹配不当，会导致总效率降低，有时造成运行时间延长百倍以上。

再者，许多任务导向计算的嵌入式性质对再生能源的能量储存和生产构成额外的技术挑战。促成超级电容器的纳米技术发展能显著提高任务能力，并帮助满足严格的体积与重量要求，如表 3 的再生能源部分所示。

优化人 / 机系统

如表 3 的第二部分所示，为降低能源需求，空军需要加强节能文化教育，使人们在从事日常网络工作时，注重培养节能意识和行为。更好的测量方法和社会媒体（比如微博、个人信息窗）能强化和指导人们的节能意识、态度、信仰和行为。改进对人类行为的认识后就能预期人的行为，从而提高行为表现和成效，防范内部威胁，提升对自主系统的信

任。要有效管理网络的数据量、处理需求和决策速度，就必须在智能扩大、认知增强、网 / 人一体化系统等领域进行研究。优化人 / 机系统必将导致更强大的战斗力、更高的系统效率及韧性，以及更快的作战节奏。

增强敏捷性和韧性

表 3 的第三部分论述通过电效率和云计算（提供不依靠地点的、规模可伸缩的、虚拟的计算、软件、数据取用和储存等各种服务）来增强网络的敏捷性和韧性。空军必须有能力不间断地监测和评估我们的能源，并具备在各种替代能源之间进行快速切换的灵活性——也许以无法预测的方式——这意味着需要对智能电网进行安全、智能的监测和控制。同样重要的是，我们必须能灵活选择何时何地在网络空间执行任务，比如说通过云计算。而且，辅助基础设施可以建在靠近低成本能源的区域。然而，为了确保空军能在云计算环境中操作，同时能保证在友好和敌对环境中的信息机密性、完整性和随时可用性，我们必须在科研方面进行投资，以获得自动的任务保障、网络敏捷性和韧性。

开创新基础概念

表 3 的最后部分涉及有可能改变相关网空能源“游戏规则”的新兴科研领域，其中有量子计算、纳米技术和超导材料等相互关联技术的发展。

基础设施能源

空军的基础设施靠能源运作来支持固定基地和远征基地执行天空 / 太空 / 网空使命，此部分能源议题涉及到能源的获得、储存和分配。目前，空军有 43 个基地在实施 85 个可再生能源项目，另有 19 个项目计划在 2011-2014 年内实施。这使空军能提前达到 2013 财年之前实现使用 7.5% 可再生能源这一目标。为满足许多基础设施对能源的需求，要求空军敢想敢为大胆引入民间技术和最佳做法。尤其棘手的是如何保障空军主要作战基地的能源安全和对前进基地部队的支援。前进基地功能越来越强大，对能源的需求也越来越大，为其保持提供运行动力势必增加后勤负担和费用。[8]

表 4 列出了空军在近 / 中 / 远期应该引领、跟进或关注的基础设施能源技术，以确保达到《2010 年空军能源计划》中提出的节能和任务目标。

能源和水效率

表 4 的第一部分有关能源和水效率。如能广泛采用规模可变的、运用先进能源诊测技术的建筑物能耗管理系统和非传统的节能型冷暖空调运行策略，可以从军队建筑物冷暖空调能耗成本中节约至少 20%（超过 2 亿美元）。[9] 将电、热、燃料、水、排废系统结合为一体化的高效率模式，可以帮助建筑物管理人员——以及远期未来的自控装置——全盘掌握该建筑物的能源使用效率，诊断建筑能源故障，评估替代节能型冷暖空调操作系统的运作状况，以及建筑物的电能消耗最佳方案，从而提高基础设施的效率、稳健性和韧性。

可再生能源

如表 4 的第二部分所述，开发可再生能源对可持续发展及环保型能源供应具有重大意义。例如，生物燃料能增加向前进基地战术车辆和冷暖空调设备的液态燃油供应；废物变能源技术可以降低对能源的需求，也能改善环境。尽管现有技术（如生物质转化、

表 4：基础设施能源科技展望（L = 保持领先；F = 保持跟进；W = 保持关注）

领域	近期（2011-15年）	中期（2016-20年）	远期（2021-25年）
能源和水效率	-- 实施智能电网技术，包括先进建筑能源与水源管理系统 (F) -- 开发能分析能源和水源系统相互依存的综合模型 (F) -- 研究低能耗供热和制冷技术 (F)	-- 自主的、可利用多种燃料的智能电网 (F) -- 智能建筑技术 (F)	-- 结合可再生性能源和核能的综合能源系统，以及创新性能源储存与节水技术 (F)
可再生能源	-- 在适当的空军设施扩大生物发电 (L) -- 应用石油替代燃料技术 (L) -- 注重提高现有风能与太阳能技术的效率 (F)	-- 利用太阳能进行热化学法发电和生产燃料 (L) -- 利用光伏技术减少后勤燃油消耗 (F) -- 在前进作战基地机场实施塑料-战术燃料转化技术 (F)	-- 灵活的现场能量采集/消费 — 光伏、太阳能、风能、生物质等 (F) -- 利用微生物燃料电池促成废物变燃料能力 (W) -- 光—电直接转换技术新概念
能源储存	-- 基地电网采用自适应储存技术；新兴电池技术 (L) -- 电化学流电容器 — 储存容量提高10倍 (L)	-- 利用金属氢化物 — 提高20倍 (L) -- 开发利用钠-空气电池 — 提高10倍 (L)	-- 超导磁能储存，这是一种颠覆性技术，能实现快速充电与放电周期 (W)
文化变革	-- 制定能量评估和电网监测措施 (L)	-- 以能耗为衡量任务影响的一项标准 (L)	
	-- 把能源效率作为关键性能参数 (F)	-- 快速应用和插用新兴能源技术 (L)	-- 采用核能技术 (W)

风力发电，或光伏电池）可以为能源自给的设施提供过渡性的供能手段，最终，液态燃料的生产仍要求开发新的阳光促变燃料技术，比如像能源部在桑迪亚国家实验室资助的试验项目（反旋环接收反应回收器）。远期的可能性包括研制微生物燃料电池，这种燃料电池相当于生物反应器，能把储存在有机化合物化学链中的能量直接转换成电能而不增加碳排放。

能量储存

表 4 的第三部分说明高效储能系统，即储能对需求变化迅速做出反应，及时稳定电网的电压和频率，对于保障主要基地的运行是必不可少的。超级电容器具备快速充电 / 放电能力，因此对解决负荷均衡、用电高峰修平，以及电网稳定等问题具有相当大的潜力。与普通电池相比，超级电容器能提供高数十倍的电量密度、快数百倍的充电 / 放电速率、长数千倍的寿命，而同时能够节省 30-80% 的成本。然而，目前的技术仍然存在能量密度低（大约低 20 倍）、成本高和自身放电等问题，因此限制了其推广使用。对中期发展，联邦政府做出巨大投资，旨在提高电池、固体氧化物燃料电池、光伏电池、高温半导体和相变材料的效率。就远期目标而言，新的高温超导材料将使磁能储存系统成为可能，从而缩短充电 / 放电之间的延时，并提供几乎实时的可用功率，短期内非常高的输出功率和高能量密度。

文化变革

如表 4 的第四部分所示：体制化的改变不仅涉及物质的发展，而且还有人员的进步。电网监测和评估能加强个人与集体的节能意识，转而激励行为改变。也可以利用社会媒

体来驱动社区行为。开发商、采办机构、测试人员和操作员等，都必须把能耗作为评价基础设施运行表现的一个关键参数，明确地把能耗和任务效果挂钩，努力保障能源优势，确保能源系统稳健运行和富有韧性。2010 年的《国防授权法》指示国防部确定其设施内核电站的可行性。例如，自动保安全、埋入地下的废物再利用小型模块化核反应堆，可以装备到用电量小于 300 兆瓦的空军基地，从而形成更安全的供电网。最后一点，空军应该利用能源基础设施试验平台（比如实验性遥驾飞机）或挑选的先行试验基地，加速能源方案从评估阶段向实施阶段转化的过程。

科技成果的交叉和互动

以上讨论表明，从基础科学研究中产生的新想法，有可能从根本上改变前面讨论的各个领域的能源景观。例如,就能源生产来说，这些发展将使我们获得超效率光伏电池、生物燃料、阳光促变石油技术，以及具备被动安全的使用废物燃料的小型模块化反应堆。在强化储能技术方面，科技的发展将导致大功率、高密度、可变充电 / 放电周期的先进电池、超级电容器、大功率飞轮和超导磁能。纳米材料技术的进展将促成重量轻且坚固的结构和纳米电子元器件。云计算和绿色超级计算技术将导致韧性强和高效率的计算方式。此外，能源微监测与控制技术将加强能源态势感知，并激励节能思维和行为。

最后，从更远期发展来看，空军的能源地平线科技展望报告中有多项涉及到多领域交叉的科研努力，有潜力改变空军在天空 / 太空 / 网空及基础设施领域各种使命的能源景观。[10] 这些努力包括在纳米结构材料、轻质、多功能结构、能承受极端条件的材料和系统、生物工程和仿生学、复杂系统的控制、信息和网络基础设施，以及信任和自主性等领域开展集体协作和攻关。

未来展望

科学和技术的发展可转化为运作优势，包括成本节约、能源韧性、系统稳健性和操作常备性。为在空军各主要使命中实现“稳固的能源优势”，空军需要做到以下几点：

• 与联邦政府相关机构协作以充分发挥能源投资的作用，这些机构包括但不限于：在航空能源方面：国防部长办公室、海军、国家航空航天局和联邦航空管理局；在航天能源方面：国家航空航天局和国家侦察局；在网空能源方面：美国网络司令部和国家安全局;在基础设施能源方面:国防部长办公室、能源部的能源应用研究项目协调办公室、国土安全部和国家科学基金会。

• 将空军的宝贵资源重点用于空军在天空 / 太空 / 网空和基础设施能源领域的特殊使命需求，同时强调财务和运行两方面效益，以及系统之系统层面的成果。

• 慎重定位自身在各种科研投资项目中的作用，例如，在航空航天能源的研究与发展方面应起领先作用；对网空能源领域的发展应做到快速跟随和尽早采纳；对基础设施能源的科研发展，除了对空军使命（如快速安全的电网部署和远征能源）有针对性意义的之外，应以观察为主。

• 视空中运作效率为第一优先，地面运作（例如：航天运行控制、数据处理中心、基础设施运行过程能源等）为第二优先。

• 运用系统论方法，即在采纳方案之前先进行商业案例分析，并考虑天空 / 太空 / 网空和基础设施各领域之间的相互依存关系，

还要运用评估标准体系来指导那些综合考虑全部负担成本和寿命周期成本的投资。

• 利用能验证运作及过程节能方案的实验性遥驾飞机等试验平台或挑选的先行试验基地，争取加速从评估和实验向实施阶段转化的过程。

• 制订相关的节能教育和培训计划，培养全员节能文化意识和行为，以确保能源优势。

因为能源无处不用，所以节约能源人人有责，只有大家一起努力，才能实现《能源地平线》的愿景，在联合和联盟作战中取得“稳固的能源优势”。主要的利益相关领域和必要的行动包括下列几项：

节能意识。通过加强能源知识宣传、培训、态势感知和激励/表扬措施，来提高节能意识，引导节能行为。

科学和技术。按照《能源地平线》中阐述的最有前途的一些能源科研方向大力开展科研攻关，重点放在那些有希望实现最大投资回报、节能效益、运行能力和优势的跨领域技术，例如高效推进系统和光伏技术、革命性新材料，以及大容量储能器等。

试验和评价。及时开展评估，引导新系统的研制尽快从设计向实用发展，以实现空军的能源目标。

分析和规划。确保严密的能源分析和论证，以达到空军的重点目标。此外，制订一种合理的方法，对“能源安全”的价值进行计算、货币化、或以其它方法进行量化，并考虑多种变量的影响，如成本、环境印记、物理安全性、韧性、灵活性/适变性，以及地缘政治风险等。

需求和采办。国防部的作战能源战略已经将能源列为一项关键的绩效指标，应坚定执行此战略，提供在需求和采购方面有韧性和不断发展的能源优势。

运作。制订和推行能同时提高效率、韧性和运作效能的运作概念、战术/战技/战规。

教育和训练。确保在我们的整个军队中各能源科学领域都充分配备科学、技术、工程和数学专业人才，以维持我们实现能源优势所必需的人力资源。

综上所述，《能源地平线》报告表明，我们的愿景是实现上面提到的“确保在天空、太空、网空和基础设施领域保持稳固的能源优势”。《能源地平线》是一部重要的文件，它指引着空军在实施本军种的各项经济、环保和运作核心使命的同时，始终保障国家的经济发展、环境保护和能源独立目标。空军认真分析近期、中期和远期中各时期科研努力，有选择地做好积极引领、快速跟随或严密观察角色，并与其他军种和机构全面合作，必能更加迅速和有效地逼近其“能源地平线”。因此《能源地平线》不仅指引我空军确保能源的稳健性、韧性和常备性，还由此进一步确保和平时期的行动效率，人道支援和救灾中的行动独立性，以及冲突中的军事优势。♣

注释:

1. US Air Force Chief Scientist, Energy Horizons: A Science and Technology Vision for Air Force Energy, 2011-2026 [能源地平线：2011-2026 年空军能源科技愿景], Report no. AF/ST-TR-11-01-PR (Washington, DC: United States Air Force Chief Scientist [AF/ST], 15 December 2011), http://www.af.mil/information/energyhorizons.asp; 另参看 Department of Defense,

Energy for the Warfighter: Operational Energy Strategy [能源为战士：作战能源战略], (Washington, DC: Department of Defense, 2011), http://energy.defense.gov/OES_report_to_congress.pdf; 另参看 Headquarters US Air Force, Air Force Energy Plan 2010 [2010 年空军能源计划], (Washington, DC: Headquarters US Air Force, 2010), http://www.dm.af.mil/shared/media/document/AFD-101202-066.pdf; 另参看 National Science and Technology Council, National Aeronautics Research and Development Plan [国家航空研究和发展规划], (Washington, DC: National Science and Technology Council, February 2010), http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/aero-rdplan-2010.pdf.

2. Headquarters US Air Force, Air Force Energy Plan 2010 [2010 年空军能源计划], 5.

3. US Air Force Chief Scientist, Energy Horizons [能源地平线：空军能源 2011-2026 年科技展望], 2.

4. James Mattice et al., Technology Insertion for Energy Savings in the Legacy Fleet [引入技术帮助现有机群节能], Report no. AFRL-RZ-WP-TR-2011-2092 (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Research Laboratory, 2011 年 7 月), 132, 284.

5. Ann Karagozian et al., Technology Options for Improved Air Vehicle Fuel Efficiency, [采用技术选项改进航空器燃油效率], Report no. SAB-TR-06-04 (Washington, DC: Air Force Scientific Advisory Board, May 2006), 16, http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA456127.

6. Jonathan Koomey, Growth in Data Center Electricity Use, 2005 to 2010 [数据中心 2005-2010 年用电量增长分析], (Oakland, CA: Analytics Press, 2011), 6.

7. SSgt J. Paul Croxon, “What's under the Hood? Air Force Scientists Build Supercomputer Using Game Consoles” [盖罩下为何物？空军科学家利用游戏机建造超级计算机], Airman Magazine 54, no. 7 (November-December 2010): 17-19, http://www.af.mil/shared/media/document/AFD-110601-016.pdf.

8. Air Force Scientific Advisory Board, Alternative Sources of Energy for U.S. Air Force Bases [美国空军基地的替代能源], (Washington, DC: Air Force Scientific Advisory Board, December 2009).

9. Executive Order (EO) 13423, “Strengthening Federal Environmental, Energy, and Transportation Management” [第 13423 号行政令：加强联邦政府环境、能源和运输管理], 24 January 2007; 和 EO 13514, “Federal Leadership in Environmental,Energy, and Economic Performance” [第 13514 号行政令：联邦政府在环境、能源和经济运作中的领导作用], 5 October 2009. 这两部行政文件都贯彻了“联邦政府在高性能与可持续发展性建筑物中的领导作用谅解备忘录”，包括 2005 年的《能源政策法案》的精神。

10. Report on Technology Horizons: A Vision for Air Force Science and Technology during 2010-2030 [技术地平线报告：2010-2030 年空军科技愿景], vol. 1, AF/ST-TR-10-01-PR (Washington, DC: United States Air Force Chief Scientist [AF/ST], 15 May 2010), http://www.af.mil/shared/media/document/AFD-101130-062.pdf.

马克・T・梅布瑞博士（Dr. Mark T Maybury），圣十字架学院文学士，兰瑟莱尔理工学院工商管理硕士，剑桥大学哲学硕士、博士，现为空军首席科学家，担任参谋长和空军部长的首席科学顾问，就一系列影响空军使命的广泛科技问题做出评价。他负责确认和分析科技问题并提请空军领导关注，与空军参谋部其他主管、作战司令官、战区司令官，以及采办和科技界交流，处理跨机构科技问题并寻求解决方案。梅布瑞博士也就关乎空军本身科技领域的问题与兄弟军种及国防部长办公室交涉。他是空军科学顾问委员会指导委员会和高级评审小组的成员，作为空军科技首席代表与民间科技工程界及社会公众交往。梅布瑞博士曾担任科学顾问委员会负责科技事务的副主席，遥驾飞机研究项目副主任，及商业太空、快速在轨最后检查和争夺性网空行动研究项目成员。他也担任过科学顾问委员会信息科技评审委员会主席，及空军研究实验室人体效应科技评审委员会副主席。此外，他还参与过国防科学委员会和情报科学委员会的若干项研究。他是前空军军官和电气电子工程师学会研究会员。梅布瑞博士现离职担任 MITRE 公司的执行总监。他编写或共同撰写过 10 部著作，撰写过 60 余篇刊物文章，并获得若干美国专利。